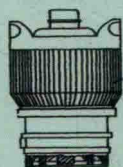
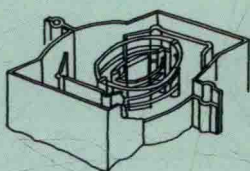


High Power Tube
Engineering Structure Calculation
Design and

大功率电子管的 结构设计 与 计算工程

郭亚明 刘志飞 朱自文 著



中国广播影视出版社

High Power Tube
Engineering Structure Calculation
Design and

大功率电子管的 结构设计 与 计算工程

郭亚明 刘志飞 朱自文 著

中国广播影视出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大功率电子管的结构设计与计算工程 / 郭亚明, 刘志飞, 朱自文著. —北京: 中国广播影视出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-5043-7699-2

I. ①大… II. ①郭… ②刘… ③朱… III. ①大功率-电子管-结构设计②大功率-电子管-计算 IV.
①TN11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 134362 号

大功率电子管的结构设计与计算工程

郭亚明 刘志飞 朱自文 著

责任编辑 王 佳

封面设计 文人雅士

出版发行 中国广播影视出版社

电 话 010-86093580 010-86093583

社 址 北京市西城区真武庙二条 9 号

邮 编 100045

网 址 www.crtip.com.cn

电子信箱 crtip8@sina.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京振兴源印务有限公司

开 本 710 毫米×1000 毫米 1/16

字 数 152(千)字

印 张 13

版 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5043-7699-2

定 价 38.00 元

(版权所有 翻印必究·印装有误 负责调换)

前 言

本书作者参与了我国多种型号和功率等级的大功率电子管的设计和制造工作，在相关的工作中留下了许多原始的计算和设计手稿。本书是对这些原始手稿进行整理、提炼而著成的。其内容有在我国首创的蒸发冷却型大功率电子管：FU = 10Z (10KW) FU - 22Z (30KW)、FU - 23Z (100KW)、FU = 105Z、(50KW)、FU - 121Z (60KW)、FU - 107Z (120KW)，单边带通讯)。FU - 108Z (400KW)、FU - 109Z (800KW)；热解石墨栅极，超蒸发冷却型：K537 (120KW)；K576 (250KW)；多元大功率电子管 3K537 (350KW)；3K576 (700KW)。

我国更改设计的有：FU - 103Z (35KW 单边带通讯)；FU - 104Z (125KW)；FU - 726F (3.2KW)；FU - 726F (M) (3.2KW)。

这些成功的工程设计文件资料，对各电子管厂的技术工作，都有直接的参考性和实践性的作用；对无线电行业的同仁是不可或缺的专业知识；对高校无线电专业的师生也是一本较好的参考教材。本书的技术文献是具体真实的可用无线电工程技术知识，是我国二十世纪中末期累积的大功率电子管结构设计与计算真实的历史传承文献。

大功率电子管设计制造的难点在于对电子管的阴极系统构件、栅极系统构件、阳极系统构件和冷却系统构件等进行设计和计算分析。电子管研制是否顺利，全在于这几种构件系统设计是否合理和工艺运

用是否得当。

本书所著的自行设计的电子管或者改制的电子管，其制造过程的用时，即从设计到制造成功都未超过三个月的时间。（除在 774 厂首先自行设计的第一支大功率的电子管 FU-105Z 之外），而且第一支电子管就能上机正常工作。

这说明：设备齐全，工艺成熟，设计制造电子管并不难。

当电子管结构不合理，工艺运用不得当，其制造成功的过程会耗时很长，有甚者这一过程会长达十几年之久，电子管仍然达不到设计指标。

设计电子管需明确了解四种电子管结构系统的性质和电子管工作的技术条件。

本书记入多元大功率电子管的设计制造方法。随着人类历史的发展，必然会使人们需要更大功率的电子管。譬如五兆瓦、十兆瓦等，多元大功率电子管是制造特大功率电子管的简便易行的方法。

本方法的出处是根据原北京工学院电真空专业的陶处良老师课堂所讲的《电子管的参数是一个平均值》而创造的。其制造方法是把多个电子管并联的电子管群，在二栅极（指四极管）引出环处加以严密的对电磁场的屏蔽，即成为多元电子管。使它成为只有输入和输出两个空间的谐振腔体，即使二栅极成为总体的屏蔽栅极隔板。

本书着重介绍我国现有热解石墨栅极的大功率电子管的制造能力，以便使需要的用户或者制造厂家及时利用本书这一成熟的信息，发展我国热解石墨栅极大功率电子管的制造业，以迎合我国对大功率长寿命电子管的需求。希望我国大功率电子管制造业赶上世界先进制造业的水平，使我们国家不再依赖外国产品。一味依赖进口产品，不仅会提高我国广播电视建设和运行的经济成本，而且会极大地影响我

国广播的播出安全，进而影响我国的政治安全。如果我国在不久的将来能够制造出和利用上五兆瓦以上的大功率电子管，将标志着我国大功率电子管的制造水平站在了世界大功率电子管制造水平的前列，我国广播电视播出的经济性和安全性也将得到极大的提高。

本书所介绍的大功率电子管的结构设计和工程计算方法已经进行过多次动态技术试验和样品试制，试制的样品也在多个发射台站进行过上机运行测试。多元大功率电子管的制造曾由国家新闻出版广电总局无线电台管理局所属的 951 台投资在抚宁县电真空器件厂制造出 8907 型 800KW 的大功率电子管；由国家新闻出版广电总局 951 台牵头，北京埃比瑞斯科技有限责任公司投资在江西景德镇 740 厂，制造出功率为 350KW 的 3K537 型电子管和功率为 500KW 的 3K576 型电子管，这三种多元大功率电子管都在 951 台等广电总局和地方广电局所属发射台站的 150KW 和 500KW 等多种型号和功率等级的短波发射机上做过动态实验。动态应用实验的结果表明，该项技术是成熟可用的。

本书作者专业知识有限，在写作的过程中得到河北科技师范学院张香斋教授的协助和指导，国家新闻出版广电总局 582 台的赵瑾、贾依娜、周平幸以及中央广播电视塔的黄丽清等同志也对本书的写作和出版提供了大量的帮助，在此深表谢意。深切希望行业同仁对本书不当之处，给予批评指正。

作 者

2016. 3. 25

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 电子管的发展历史	1
第二节 电子管的分类	3
第三节 电子管的内部结构	4
第四节 发射电子管	6
一、发射管及其特点	6
二、常用的发射电子管	10
第五节 发射电子管的极限参量和额定功率	25
一、发射电子管的极限参量	25
二、发射电子管的额定输出功率	27
第六节 大功率发射管的结构特点	28
一、大功率发射管的阳极及冷却方式	28
二、大功率发射管的阴极	33
三、大功率发射管的栅极	34
四、大功率发射管的电极结构	35
第七节 电子管的主要构件	35



第二章 大型电子管蒸发冷却技术研究	38
第一节 蒸发冷却原理	38
一、水在大容器内加热的散热过程	38
二、两种沸腾	41
三、蒸发冷却电子管散热器的合理结构	43
第二节 蒸发冷却散热器计算公式的推导	44
一、齿形蒸发冷却散热器计算公式的推导	44
二、筋形散热器的计算	52
三、管形散热器的计算	54
第三章 大功率电子管结构与计算工程	63
第一节 FU-105Z 的结构设计与计算	63
一、工程背景	63
二、阴极加热功率的确定	66
三、阴极结构设计与阴极参数计算	66
四、栅极结构参数计算	71
五、计算冷态电极尺寸	73
六、栅极计算	74
七、阳极冷却结构计算	78
八、动态计算验证	80
第二节 FU-121Z 结构设计与计算 (60KW)	84
一、历史背景	84
二、FU-105Z ₂ 的设计技术条件	84
三、FU-105Z ₂ 的阴极设计	85



四、dg1k 的选取	86
五、计算冷热电极尺寸	86
六、栅极计算	87
七、阳极蒸发冷却结构的确定	88
八、FU-121Z 动态计算	89
第三节 更改结构的大功率电子管设计	92
一、FU-103Z 更改结构设计	92
二、FU-103Z 阳极结构更换	93
三、动态计算	94
四、FU-104Z 的结构更改设计	97
五、更改的 FU-104Z 阳极	97
六、FU-104Z 动态计算	99
第四节 FU-107 的结构设计与计算	102
一、技术要求	102
二、阴极计算	102
三、热态参数计算	104
四、计算跨导 S	106
五、计算冷尺寸	107
六、确定阳极尺寸	108
七、采用齿形散热器	108
八、FU-107Z 动态计算	110
第五节 FU-108Z (400KW) 的结构设计与计算	112
一、400KW 发射管的计算	112



二、阴极计算	113
三、热态计算	114
四、计算冷电极尺寸	116
五、栅极网络计算	117
六、板极耗散功率计算	117
七、栅极耗散功率	118
八、由不产生虚阴极条件计算阳极尺寸	118
九、阳极散热器的计算	119
十、FU-108Z 动态计算	121
第六节 FU-109Z (800KW) 发射管的结构设计与计算	123
一、设计大功率电子管 FU-109Z 的时代背景	123
二、最大发射电流的计算	123
三、阴极计算	124
四、热态计算	125
五、计算冷电极尺寸	127
六、栅极网格计算	128
七、板极耗散功率计算	129
八、栅极耗散功率	129
九、由不产生虚阴极条件选阳极尺寸	130
十、阳极散热器的计算	131
十一、动态计算	133
第七节 FU-726F 和 FU-726F (M) 的设计	135
一、项目背景	135



二、TH289 管的技术要求	135
三、阴极设计	136
四、碳化阴极规范计算	137
五、一栅极结构计算	138
六、栅极热计算 (M 型)	139
七、栅极热计算 (非 M 型)	141
八、阳极尺寸	142
第八节 500KW 多元管的单元管结构设计与计算工程	144
一、组合多元大功率电子管的研发背景	144
二、TH576 解剖结构数据	146
三、3K576 结构设计与计算	147
第九节 一兆瓦的大功率电子管结构设计与计算	156
一、阴极结构设计与计算	156
二、一栅极设计	157
三、二栅极设计	159
四、阳极设计的计算	161
五、验算放大系数 μ	162
第四章 多元大功率电子管的设计思路	164
第一节 多元大功率电子管	164
一、多元大功率电子管的结构设计	164
二、多元电子管存在的理论基础	165
三、多元大功率电子管的组装	167
四、多元电子管的参数计算	168



五、多元电子管的优点	169
第二节 K576 型电子管结构与计算	170
一、原始给出静态参数	170
二、选定几何参数	170
三、验算放大系数	171
四、栅极尺寸	171
第五章 热解石墨栅极	174
第六章 大功率电子管的寿命	178
附 录	
附录一 主要参考书目	183
附录二 确定电子管的极间距离时, 用于不出现小岛效 应时的函数曲线	184
附录三 用奥伦多夫公式计算放大系数时 所需用的参数函数表	185
附录四 栅极老炼用确定栅极所加最高温度的最大功率的 最大功率密度的函数曲线	186
附录五 K576 的排气规范	188
附录六 K576 的阴极碳化规范	194

第一章 绪 论

第一节 电子管的发展历史

1883年，美国著名的发明家托马斯·阿尔瓦·爱迪生（Thomas Alva Edison, 1847 ~ 1931）在为寻找电灯泡灯丝材料所做的实验中发现了一个意外的现象。他在真空电灯泡内部碳丝附近安装了一小截铜丝，希望铜丝能阻止碳丝蒸发，但结果却未能如愿，不过他无意中发现，没有连接在电路里的铜丝，却因接收到碳丝发射的热电子产生了微弱的电流。当时爱迪生正潜心研究城市电力系统，没重视这个现象，但他为这一发现申请了专利，并命名为“爱迪生效应”。

世界上第一只电子管是英国电机工程师、物理学家约翰·安布罗斯·弗莱明（John Ambrose Fleming, 1864 ~ 1945）发明的真空二极管。1882年，弗莱明曾担任爱迪生电光公司技术顾问。1884年，弗莱明出访美国时拜会了爱迪生，共同讨论了电发光的问题。爱迪生向弗莱明展示了一年前他在进行白炽灯研究时，发现的一个有趣现象



(即爱迪生效应): 把一根电极密封在碳丝灯泡内, 靠近灯丝, 当电流通过灯丝使之发热时, 金属板极上就有电流流过。爱迪生进一步试验让板极通过电流计与灯丝的阳极相连时有电流, 而与灯丝阴极相连时则没有电流。弗莱明对这一现象非常感兴趣, 回国后, 他对此进行了一些研究, 认为在灯丝板极之间的空间是电的单行路。

1896 年, 马可尼无线电报公司成立, 弗莱明被聘为顾问。在研究改进无线电报接收机中的检波器时, 他就设想采用爱迪生效应进行检波。弗莱明在真空玻璃管内封装入两个金属片, 给阳极板加上高频交变电压后, 出现了爱迪生效应, 在交流电通过这个装置时被变成了直流电。弗莱明把这种装有两个电极的管子叫作真空二极管, 它具有整流和检波两种作用, 这是人类历史上第一只电子器件。弗莱明将此项发明用于无线电检波, 并于 1904 年 11 月 16 日在英国取得了发明专利。

1906 年, 美国发明家德福雷斯特 (De Forest Lee, 1873 ~ 1961), 在二极管的灯丝和板极之间巧妙地加了一个栅板, 从而发明了第一只真空三极管。这一小小的改动, 竟带来了意想不到的结果。它不仅反应更为灵敏、能够发出音乐或声音的振动, 而且集检波、放大和振荡三种功能于一体。因此, 许多人都将真空三极管的发明看作电子工业真正的诞生起点。德福雷斯特自己也非常惊喜, 认为“我发现了一个看不见的空中帝国”。电子管的问世, 推动了无线电电子学的蓬勃发展。到 1960 年前后, 西方国家的无线电工业年产 10 亿只无线电电子管。电子管除应用于电话放大器、海上和空中通讯外, 也广泛应用于广播电视领域, 将新闻、教育节目、文艺和音乐播送到千



家万户。三极电子管以后，又出现了四极管、五极管、六极管、七极管，更多极的电子管和复合管，形成了包括收信管、发射管、低频管、高频管、微波管和超小型管等系列。本文所介绍的电子管主要为发射管。

第二节 电子管的分类

1. 按用途分类

电子管按其用途的不同可分为电压放大管、功率放大管、充气管、闸流管、引燃管、变频管、整流管、检波管、调谐指示管（电眼）、稳压管等。

2. 按电极数分类

电子管按其电极数的不同可分为电压放大管、三极管、四极管、五极管、六极管、七极管、八极管、九极管和复合管等。三极以上的电管又称为多极管或多栅管。

3. 按外形分类

电子管按其外形及外壳材料可分为瓶形玻璃管（ST管）、“橡皮”管、筒形玻璃管（GT管）、大型玻璃管（G式管）、金属瓷管、小型管（也称花生管或指形管、MT管）、塔形管（灯塔管）、超小型管（铅笔形管）等多种。

4. 按内部结构分类

电子管按其内部结构可分为单二极管、二极管、双二极管、三极管、



双二极管极管、单三极管、功率五极管、束射四极管、束射五极管、双一极管、二极——五极复合管、又束射四极管、三极—五极复合管、三极—六极复合管、三极—七极复合管、束射功率各处室等多种类型。

5. 按阴极的加热方式分类

电子管按阴极的加热方式可分为直热式阴极电子管（电流直接通过阴极使其达到热电子发射状态）和旁热式阴极电子管（通过阴极旁的灯丝加热阴极）。

6. 按屏蔽方式分类

电子管按屏蔽方式可分为锐截止屏蔽电子管和遥截止屏蔽电子管。

7. 按冷却方式分类

电子管按冷却方式可分为自然冷却式电子管、水冷式电子管、风冷式电子管和超蒸发冷却式电子管等类型。

第三节 电子管的内部结构

1. 电子管的阴极

阴极是用来放射电子的部件，分为氧化物阴极和碳化钨钨阴极。一般来说氧化物阴极是旁热式的，它是利用专门的灯丝对涂有氧化钡等阴极体加热，进行热电子放射。寿命一般在 1000 ~ 3000 小时。碳化钨钨阴极一般都是直热式的，通过加热即可产生热电子放射，



所以它既是灯丝又是阴极。理论上碳化钨阴极比氧化物阴极寿命长得多,一般在 2000 ~ 10000 小时以上。大功率发射管应用最为广泛的是碳化钨阴极,氧化物阴极一般在输出功率为 1KW 以下的发射管中应用。

近年来采用网状阴极的大功率发射管较多。网状阴极是用较细的钨丝做成圆筒状,其优点是:

- (1) 由于它用很多根钨丝编成,所以导流系数较大。
- (2) 易于实现较小的阴栅间距,有利于提高跨导。
- (3) 由于灯丝是网状结构,单根灯丝的电流较小,局部磁场较弱,从而阴极电流所产生的交流声也较小。

2. 电子管的栅极

电子管的栅极根据它们 在管中所起的作用不同分为一栅、二栅,有时也称为控制栅、帘栅。第一栅的主要作用是控制阴极电流,二栅的作用是屏蔽板极对第一栅的影响。栅极结构关系到本身的机械强度和散热效果,关系到管子可否稳定工作。为了减小电子的渡越时间,栅阴间距做的很短甚至不到 1mm,因此厂商多采用机械强度高、导热系数高、辐射系数好以及熔点高的材料来做栅极,以避免在很小的间距下发生热碰极。一栅和二栅应严格对栅,这样帘栅对电子截获小,可减小帘栅耗,改善电流分配提高性线。

3. 电子管的阳极

阳极是收集阴极发射出来的大部分电子的电极。电子管工作时,由于电子管轰击板极表面,以及其它电极的热辐射,在板极产生大量热能,因其板极的耗散功率密度是每平方厘米几十瓦到几百瓦,这样